

Energierendement (EROI) en de falende energietransitie

Quintijn Hoogenboom, januari 2026



Kolenschip op de Waal, foto Quintijn Hoogenboom

Helaas ben ik zeer pessimistisch over de mogelijkheden van de energietransitie, wat betekent, als ik gelijk heb, dat we na de fossiele energie terugvallen naar een maatschappij die met veel minder energie zal moeten zien te overleven op een dan door klimaatverandering geteisterde planeet. Recent maakte ik hierover ook een podcast met vergelijkbare inhoud als dit artikel.¹

De energietransitie kost meer energie dan ooit aan de maatschappij teruggeleverd zal worden. Het energierendement van de hernieuwbare energie, de *'renewables'* wind, zon, biomassa, waterkracht, is te laag om onze maatschappij draaiende te houden.

Onze welvaart, onze hoogontwikkelde technologische samenleving, tot en met computers, internet en sinds kort AI, vraagt om veel, heel veel, energie en kan zonder fossiele brandstoffen niet in stand worden gehouden.

Alles draait om energie. Oorlogen zijn uitgevochten om oliebronnen, denk recent aan Venezuela. Maar bovenal: energie is voor het leven op Aarde van fundamenteel belang.

Definitie EROI of Energierendement:

EROI = opbrengst van energie : (staat tot) energie die nodig was om die energie te vergaren

In het Engels: *'Energy return on invested'* , of *'Energy return on energy invested'*, de afkorting is dan EROEI. De energie die bruto wordt geleverd gedeeld door de energie die daarvoor moest worden geïnvesteerd (de tarra). De teller minus de noemer, Bruto – Tarra, is de netto energie, die beschikbaar is voor de gewenste activiteit.

Vergelijk het met het financiële rendement van een bedrijf: de opbrengsten van een bedrijf moeten hoger zijn dan de kosten, zowel de vaste kosten (huisvesting, machines, salaris personeel), als de variabele kosten, de productiekosten van de artikelen, waar hopelijk winst

op wordt gemaakt. Netto is de winst. De nettowinst is dan het bedrag boven de streep minus het bedrag onder de streep, Bruto – Tarra.

Het rendement is, opnieuw, de teller gedeeld door de noemer (Bruto : Tarra) in bovenstaande vergelijking, maar dan voor geld. En moet groter zijn dan één. Daalt het rendement onder de één dan draait het bedrijf verlies, en we noemen zo'n rendement dan meestal negatief.

Nu van de financiële wereld naar de biologische werkelijkheid.

Biologie

Elk individu van een soort (dieren, maar natuurlijk ook planten en alle 'kleine diertjes') moet meer energie weten te verzamelen dan het moet 'uitgeven' om die energie te verzamelen.

Voorbeeld ijsbeer: een volwassen ijsbeer moet met jacht aan voedsel komen. Dat kost hem of haar energie. Wat hij weet te doden en op te eten moet meer energie bevatten dan de vaste energie die het leven hem kost (metabolisme, het lichaam moet in leven worden gehouden), plus de variabele energie die het vangen en doden van dat dier hem kostte. Je ziet wel eens filmpjes van een uitgeputte ijsbeer die niet meer de energie heeft om zijn prooi te vangen. Zijn energierendement, EROI, was op het laatst kleiner dan één.

Voorbeeld zalm: De grote man van het EROI-onderzoek C.A.S. Hall, (Charles of Charley), is bioloog en ecooloog, inmiddels een oude man. Hij onderzocht in de vorige eeuw waarom zalmen de rivier op trekken om te paaien en dan weer naar zee om aan te sterken. Dat lijkt een enorme investering van energie.

Het bleek dat zalmen die dat niet doen een EROI hadden van 2:1, zalmen die trekgedrag vertoonden wisten hun EROI te vergroten tot 5:1. Die hadden dus meer surplus energie en meer kansen om te overleven. In de zee was veel meer voedsel te vinden dan in de rivier.ⁱⁱ

Voorbeeld planten: planten halen hun energie uit de zon door fotosynthese. Dit is een proces dat al meer dan een miljard jaar zo functioneert, en heeft een netto-opbrengst van misschien 2%. Dat betekent een EROI van 102:100 ofwel een 1,02:1 (of simpelweg 1,02). In feite is al het dierenleven mogelijk doordat ze de door planten opgeslagen zonne-energie als voedsel konden en kunnen gebruiken.

Voorbeelden menselijke geschiedenis

Homer-Dixon schrijft in zijn boek 'Ten onder te boven' over de **Romeinen**, en schat dat de Romeinse boeren met hun tarweteelt een EROI hadden van 12 (12:1), terwijl de luzerneteelt voor de paarden een EROI had van 27 (of 27:1). Desondanks vermoedt hij dat het Romeinse Rijk is ingestort doordat het te veel energie ging kosten om de lange aanvoerlijnen van producten naar de stad Rome in stand te houden. En ook de communicatielijnen werden te lang.ⁱⁱⁱ

Charley Hall beschrijft een nog bestaande jagerverzamelaarsstam, de **!Kung** (spreek uit kuung) uit de Kalahariwoestijn. Deze stam heeft een EROI van naar schatting 10. Dat lijkt relatief hoog, maar ze moeten hiermee ook periodes van schaarste overbruggen, en ze

kunnen met hun zwervende bestaan geen voorraden aanleggen. Maar in goede periodes hebben deze mensen een goed leven en veel vrije tijd! Ook schat men dat prehistorische jagerverzamelaars een hoge EROI hadden en een goed leven.^{iv}

Energievoorziening

De EROI-discussie spitst zich de laatste tientallen jaren toe op het energierendement van fossiele brandstoffen enerzijds en anderzijds de mogelijkheden van hernieuwbare energie, 'renewables', om de fossiele-energievoorziening over te nemen vanwege het CO2-probleem en omdat de fossiele brandstoffen opraken. Maar eerst nog een blik in de geschiedenis.

Enkele ruwe schattingen

Een zeer gerenommeerde EROI-deskundige, de Spaanse wetenschapper Inigo Capellán Pérez, schat dat de Europese bevolking tot ongeveer 1650 een EROI had van ongeveer 5.

Met de komst van steenkoolwinning, eerst in Engeland, vooral in de 19^e eeuw, steeg de EROI naar ongeveer 10.

Met de komst van de olie, rond het begin van de 20^e eeuw, steeg de EROI in de rijke landen, die olie konden kopen, naar 30. Gedurende een korte periode was de EROI misschien zelfs groter dan 100.

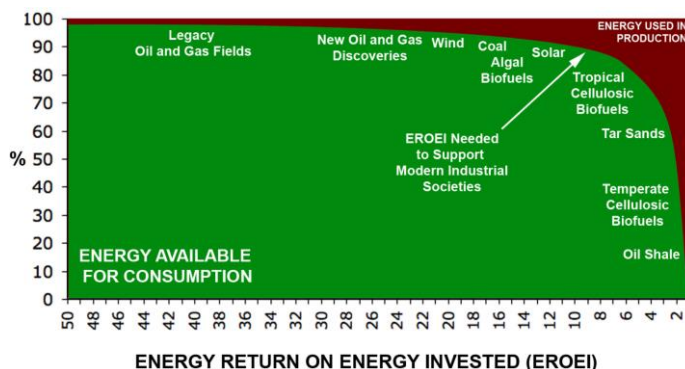
Neergang

En nu komen we op de huidige periode waarin de voorraden fossiele brandstoffen, kolen, olie en gas, slinken en waarbij we bovendien met het verbranden ervan de Aarde aan het opwarmen zijn. Een dubbel probleem dus en tevens een dilemma.

De EROI van fossiele brandstoffen daalt doordat de slinkende voorraden ook steeds moeilijker te winnen zijn, wat steeds meer energie kost.

Netto Energie klif

En dan kom je bij de zogenaamde Netto Energie Klif: wanneer de EROI van een bron onder ongeveer 10 zakt, wordt de situatie snel nijpender.



De Netto Energie Klif. Y-as: het percentage 'Energie beschikbaar voor consumptie', X-as: de EROI (= 'EROEI'). Verschillende energiebronnen worden weergegeven, Kolen, voormalige/actuele/toekomstige olie- en gasvelden, wind, zon, enz. Wanneer de EROI van moderne brandstoffen lager wordt, is steeds meer energie 'van de maatschappij' nodig om nieuwe brandstoffen te delven. (Wikimedia.)

Bij de winning van fossiele brandstoffen in de vorige eeuw(en) kwam er zoveel energie beschikbaar, dat alle energie die nodig was voor winning en transport, maar bijvoorbeeld ook voor het levensonderhoud van de mijnwerkers in Limburg en hun gezinnen, ermee 'bekostigd' konden worden.

Met de opbrengsten (geld en energie) van het aardgas uit Groningen kon naast het Gronings Museum ook een landelijk leidingennet en vernieuwing of ombouw van alle gasapparaten worden bekostigd en en passant onze welvaartsstaat.

Bij de lagere EROI die ons te wachten staat wordt het steeds lastiger te om deze welvaart te blijven realiseren.

Welke EROI hebben we nodig?

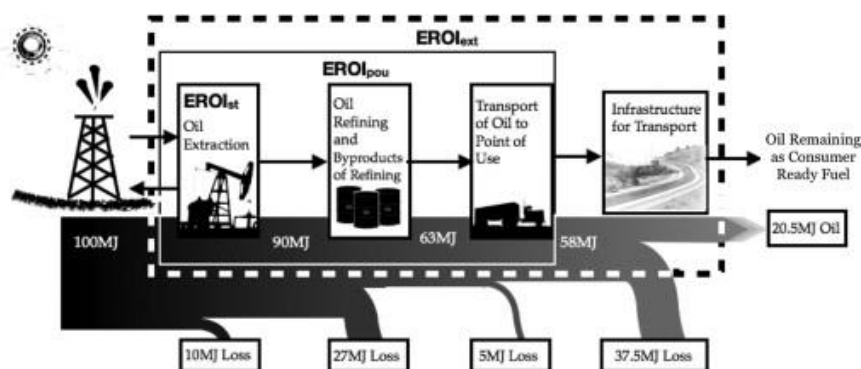
Om dit inzichtelijk te maken is de 'EROI-piramide' ontworpen. Naarmate onze maatschappij luxer en complexer wordt, is de benodigde hoeveelheid energie om deze 'toestand' te behouden steeds groter. Een EROI van rond de 15 wordt minimaal nodig geacht om onze huidige maatschappij, inclusief geavanceerde gezondheidszorg en wetenschap en kunsten, in stand te houden.^v

Verschillende soorten EROI

Helaas zijn er verschillende soorten EROI-getallen.

- Reken je vanaf de uitgang van de kolenmijn of het olieveld (EROI_{st}, standard)?
- Of moeten transport en raffinagekosten erbij worden geteld (EROI_{pou}, point of use)?
- Of moeten alle bijkomende energiekosten, zoals infrastructuur voor transport, maatregelen voor de onregelmatige aanvoer ('intermittency' bij zon en wind), de energiekosten van de mensen die in de mijnen of in de zonnepanelenindustrie, installatie en onderhoud werken, ook worden meeberekend (EROI_{ext}, extended)?

Merk op dat bij de Netto Energie Klif hierboven vooral met EROI_{st} getallen wordt gewerkt.



Grenzen van verschillende soorten EROI-analyses door het energieverlies bij het winnen en verwerken van olie, wanneer het wordt getransformeerd van 'olie bij de bron' tot brandstoffen gereed voor consumentengebruik. (Lambert en Lambert, 2009).^{vi}

In bovenstaand voorbeeld is de:

- EROI_{st} = 100 : 10 = 10 : 1 = 10 (de Tarra is 10MJ, Netto is 90 MJ)
- EROI_{pou} = 100 : 42 ≈ 2,5 (Netto = 58 MJ)
- EROI_{ext} = 100 : 79,5 ≈ 1,3 (Netto = 20,5 MJ)

Voorbeeld, kolen

Stel je bestelt bij de kolenboer om de hoek een zak kolen van 40 kilo, voor gebruik in je kolenkachel en kolenfornuis thuis.

- Als er 3 kilo kolen nodig was om die hoeveelheid kolen uit de mijn te halen is de $EROI_{st} \approx 43 : 3 = 14$ (Bruto is nu 43, om op Netto = 10 uit te komen).
- Als er voor het transport naar de kolenboer 1 kilo nodig is, wordt de $EROI_{pou} = 44 : 4 = 11$ (Tarra is $3 + 1 = 4$).
- Reken je nog 2 kilo om, mede, in het energiegebruik van de mijnwerkers en de kolenboer en hun gezinnen te voorzien dan wordt de $EROI_{ext} = 45 : 6 = 7,5$.

(De Tarra-energie om die kolen te winnen en te transporteren hoeft ook niet speciaal kolenenergie te zijn, dat kan ook olie (benzine, diesel) of elektriciteit (treinen) zijn. Voor bovenstaande EROI-rekensommen maakt dat niet uit.)

Kolen, korte en lange aanvoerlijnen

Eerst ontstond er zware industrie nabij de kolenmijnen, in Engeland en Wales, in Zuid-Limburg en in België in de Ardennen en de Borinage. En natuurlijk ook in het Ruhrgebied. Kolen die daar gedolven werden konden via korte aanvoerlijnen gebruikt worden.

Nu worden de kolen op de Maasvlakte aangevoerd (en bij Tata in IJmuiden) in enorme schepen (vooral vanuit Australië, de VS en tot 2022 Rusland). Via rivierboten ploegen ze de Rijn op naar Duisburg en omstreken. Dat kost veel energie! Een lange reis voordat de kolen verstoekt kunnen worden. Maar het kan blijkbaar nog uit, doordat er in de fossiele brandstoffen zo verschrikkelijk veel energie (hoge EROI) zit en ook nog eens in een compacte vorm, dus in een hoge dichtheid en klein volume.

(Zie de illustratie aan het begin van dit artikel.)

The devil is in the details

Zolang de EROI behoorlijk hoog was het bij de Tarra, de energie die voor het verkrijgen ervan nodig was, niet zo belangrijk om alle factoren heel precies te berekenen. Economisch bleek het rendabel te zijn, en dat kwam juist doordat in de fossiele brandstoffen heel erg veel energie zit.

Voor olie was het nog gunstiger dan voor kolen, een EROI van meer dan 50 werd aanvankelijk gehaald, zeker bij de oliebron zelf.

Ook voor het aardgas in Nederland was de EROI hoog, het gas was makkelijk te winnen. Zie boven.

En omdat het verbranden van aardgas schoner is dan dat van steenkool, werden de mijnen in Limburg gesloten. Het kon allemaal niet op!

Helaas raken kolenmijnen, oliebronnen, gasbronnen, uitgeput. Leeg raken ze niet, maar het wordt wel steeds duurder om de olie, kolen en gas uit de grond te halen. Niet alleen financieel, ook energetisch. Daardoor kan de EROI van gas maar zo dalen van 20 tot onder de 10. En met lagere EROI waardes wordt het steeds belangrijker om de energie die nodig is om

de energie te winnen en bij de consument te brengen goed uit te rekenen. Dat is, nogmaals, die energieklijf. Voor je het weet ben je factoren vergeten en heb je een negatieve EROI (negatief betekent in dit verband lager dan 1 : 1 ofwel lager dan 1). En dan kost het dus meer energie om de energie te winnen dan ze uiteindelijk oplevert. Dan had je ze maar beter in de grond kunnen laten zitten.

Renewables

En met dat vraagstuk zitten we met de *'renewables'*, elektriciteit van zonnepanelen, windmolens, en de opslag van tijdelijk overvloedige energie in accu's of waterstof.

Aanvankelijk was iedereen optimistisch over de energietransitie, het inzetten van windmolens, zonnepanelen, en het benutten van waterkracht. Het rendement leek hoog, een windmolen was binnen enkele jaren terugverdiend. Dit lijkt nu enorm tegen te vallen.

- Ten eerste was de terugverdientijd in geld gerekend, niet in energie.
- Ten tweede werd (en wordt?) onvoldoende rekening gehouden met de energie- en materiaalkosten van de bouw, laat staan ontmanteling van windmolens en zonnepanelen.
- Een derde, zeer essentiële factor is de onregelmatige aanvoer van zon en wind, de *'intermittency'*.

Windmolens en zonnepanelen hebben daardoor *'voor de maatschappij'* een EROI van ver onder de 10.

- Grootschalige projecten van zonnepanelen in Spanje hadden, wanneer zoveel mogelijk alle verliesfactoren worden meegeteld, een EROI van minder dan 3.^{vii}
- Onlangs kwam in het nieuws dat modellering van windparken op zee geen rekening had gehouden met *'vuile wind'* (zeilersterm), waardoor de verwachte productie met 20% naar beneden moet worden bijgesteld ten opzichte van eerdere berekeningen. Dus moeten er 20% meer windparken worden aangelegd om aan de doelstellingen te voldoen en daalt de EROI van windenergie navenant.

Wanneer energie onder de werkelijke kostprijs wordt verhandeld bedriegen we onszelf, en dat deden we klaarblijkelijk bij onze optimistische berekeningen over de terugverdientijd van windmolens en zonnepanelen.^{viii}

Wind en zon versus fossiel

In elk geval is duidelijk dat energie die direct komt van wind en zon te weinig energie opbrengt om te kunnen concurreren met fossiele energie. Kolen, olie en gas zijn ontstaan doordat plantenresten, door zonne-energie middels fotosynthese *'gemaakt'*, op de zeebodem terecht kwam, en werd overdekt met sediment en samengeperst. Een uniek en eenmalig proces in onze geologische geschiedenis gedurende een periode van 10 miljoen jaar, zo'n 100 miljoen jaar geleden, gedurende zeer warme omstandigheden. En die energie jagen we er in enkele eeuwen doorheen.

Ook de energiedichtheid van directe zonne-energie is te laag om in de enorme behoeftes van onze moderne maatschappij te voorzien. De samengebalde fossiele energie heeft behalve

een hoge EROI ook een grote energiedichtheid. Denk aan de energie die er in een gevulde benzinetank zit.

Nederlandse polders

Om dit te illustreren nog een zijsprong: in de 17^e eeuw zijn in het rijke westen van Nederland, Holland, meren ingepolderd, zoals de Beemster, de Purmer en de Wormer. Dat was rond 1650 onder leiding van Leeghwater. Dé grote uitdaging was de Haarlemmermeer, welke tot een oncontroleerbare binnenzee dreigde uit te groeien. Met de windmolens van Leeghwater lukte het niet om de Haarlemmermeer aan te pakken. Het heeft geduurd tot 1850 tot de Haarlemmermeer kon worden drooggemalen met behulp van stoommachines, gestookt op steenkool. Dit illustreert het grote verschil tussen windenergie uit met de hand getimmerde windmolens uit de 17^e eeuw en de stoommachines van de 19^e eeuw.^{ix}

Waterkracht

Waterkracht is een vergelijkbaar verhaal, maar toch iets anders. De capaciteit is beperkt tot plaatsen waar veel hoogteverschil is. Men probeert waterkracht ook toe te passen voor opslag van energie, maar dat heeft behalve rendementsverlies ook enorme ecologische effecten: door het snel dalen en stijgen van het waterpeil gaat al het leven rond zo'n meer ter ziele. De vele stuwdammen in de wereld hebben ook een desastreus effect gehad op trekvissen, zoals zalm en paling.

Opslag van elektriciteit, accu's

De energietransitie is vooral gericht op elektriciteit, terwijl dat slechts een beperkt deel van onze energiebehoefte dekt. Maar goed. Opslag van elektriciteit, dat is al meer dan een eeuw een 'uitdaging'.

Accu's zijn een geweldige uitvinding, op kleine schaal voor zaklantaarn, telefoon en laptop. En nuttig voor toepassingen zoals boeien op zee, samen met zonnepanelen, waar een aansluiting op het stroomnet niet mogelijk is. En natuurlijk voor accu's in auto's en vrachtwagens voor de startmotor en de verlichting.

Accu's voor elektrische personenauto's hebben een vele malen grotere capaciteit nodig, en hebben daardoor dus veel meer kostbare materialen, zoals metalen, nodig.

Detail? Nikkel

Voor die accu's is onder andere nikkel nodig, dat (onder andere) in grote mijnen op Borneo wordt gedolven. Wanneer je het personenautopark 100% elektrisch wilt maken, moet je heel Borneo omploegen om aan voldoende nikkel te komen. Gesteld dat nikkel in gelijke mate op heel Borneo voorkomt als in het huidige mijngebied. Borneo opofferen voor de elektrische auto's.^x

Maar waar het voor het transport werkelijk om gaat zijn vrachtauto's en de scheepvaart. Het idee om daar accu's voor in te zetten, om elektrische aandrijving mogelijk te maken, is ronduit absurd. En dan hebben we het nog niet eens over de luchtvaart gehad.

Waterstof

Waterstof is het grootste bedrog in dit hele verhaal. Het is extreem duur om te produceren, zowel in geld als in energie. De apparatuur die ervoor nodig is heeft ook weer veel dure en gevoelige materialen nodig. Daarbij zijn de verliezen bij winning, opslag, transport en weer omzetten in elektriciteit simpelweg te groot voor zinvolle toepassingen. Dat het inzetten van waterstof voor de energietransitie onmogelijk is blijkt alleen al uit het feit dat alle aanvankelijk 'veelbelovende projecten' op dat gebied na korte tijd weer worden afgeblazen.

De balans

We zullen het met de ons nog resterende fossiele energie moeten doen. Maar tegelijkertijd wil de wereld het gebruik van fossiele energie versneld afbouwen, om het klimaatprobleem, de opwarming van de Aarde door de overmatige uitstoot van CO₂, minder ver uit de hand te laten lopen. Daar is echter helaas weinig kans op. Een duivels dilemma dus. Dat duurzame energie niet werkt werd enkele jaren geleden in een televisie-interview zo uitgesproken door de topman van ExxonMobil in de oneliner: "*Its not gonna work*".^{xi}

Zoals Alice Friedemann schrijft: we zijn aangewezen op biomassa, 'Wood World'.^{xii} We zullen al onze energie uit hout moeten halen. Voorlopig kan dit niet, omdat we met teveel zijn en omdat ons consumptieniveau veel te hoog is. Niet alleen individueel, maar ook als maatschappij, met al zijn snelwegen, kantoren, legers, kustverdediging, poldergemalen en internet, met als klap op de vuurpijl AI. Hoewel we - terecht - met individuele energiebesparing wat willen bereiken, moeten we ons ook realiseren dat onze maatschappij een soort super-organisme is dat zelf ook steeds meer energie verlangt, zie de vorige zin.^{xiii}

Wat dan wel?

De Werkgroep Voetafdruk Nederland^{xiv}, waar ik in een vorige podcast^{xv} over vertelde, heeft als twee elkaar versterkende 'pijlers':

- Minder mensen, al is dit iets van de lange termijn,
- Beperken van de consumptie per persoon door het rantsoeneren van CO₂. Hiermee wordt een zuiniger leven beloofd en een verspillend leven duurder gemaakt.

Daar hebben wij enkele jaren geleden nog een punt aan toegevoegd: Radicale Regionalisering. De mondiale handelstromen zouden beperkt moeten worden, en we zouden veel meer producten uit onze omgeving moeten gebruiken.

Het is mager, en heel moeilijk om de trend te keren. Wanneer de benzineprijzen met 5 of 10 cent stijgen, wordt Frankrijk door de gele hesjes platgelegd. En die benzineprijzen stijgen toch echt, het kan niet anders. En dan nog alle oorlogen.

Hoe het moet wanneer olie, kolen en gas echt veel schaarser en daardoor duurder worden en de klimaatopwarming echt doorzet? Ik zou het niet weten.

(voor de eindnoten, zie de volgende pagina)

-
- ⁱ Via AardeInBalans ([AardeInBalans.nl/podcast/#aioseo-40-over-de-energie-transitie-eroi-uitgelegd-door-quintijn-hoogenboom-484](https://aardeinbalans.nl/podcast/#aioseo-40-over-de-energie-transitie-eroi-uitgelegd-door-quintijn-hoogenboom-484)) of in uw favoriete podcast app.
- ⁱⁱ Lezing van Charley Hall (deepresource.wordpress.com/2017/03/04/charles-hall-on-eroei/) of direct: youtube.com/watch?v=teDqDyvnTxc. Op 6 min over migrating fish. De hele lezing is zeer de moeite waard, maar soms moeilijk te volgen. Zie ook verwijzingen hieronder.
- ⁱⁱⁱ Homer-Dixon, Ten onder te boven, p70, Jan van Arkel, 2006
- ^{iv} Zie lezing van Hall, 12:30 min.
- ^v Zie lezing van Charley Hall, 52:30 min.
- ^{vi} Bron Lambert en Lambert, 2009, sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513003856
- ^{vii} Prieto en Hall, Spain's Photovoltaic Revolution, Springer 2013. Zie ook lezing van Hall, 33:15 min.
- ^{viii} Kijk (nogmaals) naar de film The Planet of the Humans uit 2019, van Jeff Gibbs. en.wikipedia.org/wiki/Planet_of_the_Humans of youtube.com/watch?v=Zk11vl-7czE.
- ^{ix} Waterwolven van Cordula Rooijendijk, H 4 en 5, uitgave Atlas 2009
- ^x Berekening op 'achterkant van een bierviltje' n.a.v. een artikel in Trouw over de nikkelmijnen op Borneo
- ^{xi} Details heb ik niet goed genoteerd helaas. Maar de oliemaatschappijen, ook Shell, wisten al eind vorige eeuw dat duurzame energie niet zou gaan werken. Om energetische redenen, waardoor er ook geen winst op gemaakt zou kunnen worden.
- ^{xii} Alice J. Friedemann, Life after Fossil Fuels, Springer, H 13. Zie ook: energyskeptic.com/2022/methods-to-preserve-knowledge-for-wood-world-for-life-after-fossil-fuels
- ^{xiii} Lees ook Wildgroei van Rob Hengeveld, zie ook voetafdruk.eu/nieuws/2013/20130408wildgroei.html
- ^{xiv} voetafdruk.eu/onzevoetafdruk
- ^{xv} Podcast met AardeInBalans, aardeinbalans.nl/podcast/#aioseo-aflevering-004-over-onze-voetafdruk-en-overbevolking-quintijn-hoogenboom-56